

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820100154012

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

InGaN 太阳能电池的制备及特性研究

Fabrication and Characteristics of InGaN Solar Cell

蔡晓梅

指导教师姓名: 张 保 平 教 授

专 业 名 称: 微电子学与固体电子学

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(InGaN太阳能电池的制备及特性研究)课题的研究成果,获得(张保平教授)课题组经费或实验室的资助,在(微纳光电子研究室)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ☒ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

III族氮化物宽禁带材料的研究与应用是目前半导体行业的前沿和热点,主要包括 GaN、InN、AlN 及其三元和四元合金(InGaN,AlGaN,InAlN 和 AlInGaN)。其中 InGaN 材料以其优越的光伏特性,迅速成为近年来国际上的研究热点。它具有连续可调的宽带隙(0.65 eV ~ 3.42 eV),其吸收光与太阳光谱几乎完美匹配,在整个组分范围内均为直接带隙材料,还具有高电子迁移率、高吸收系数、高硬度、强抗辐射能力等优点,在发展高效多节电池和空间太阳能电池上具有广阔的应用前景。本文围绕电池性能,在外延材料生长、结构设计、器件制作、性能表征等多方面进行了系统深入的研究,主要工作内容包括以下几个方面:

(1) 制作的低 In 组分 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ p-i-n 同质结(HOJ)太阳能电池具有良好的光电响应特性, $x=0.02$ 电池的开路电压(V_{oc})和填充因子(FF)分别高达 2.24 V 和 69%。进一步研究表明,随着 In 组分的提高,短路电流密度(J_{sc})变大,而 V_{oc} 却急剧减小,且下降幅度远大于材料带隙引起的减小量。通过多种表征手段深入分析了此现象的内在机理,提出高 In 组分样品中高密度缺陷是导致 V_{oc} 降低的重要因素,提高材料质量是关键。

(2) 结合外量子效率(EQE)响应谱,分析了 p-GaN 厚度对电池高能光子响应的重要影响,并阐明窗口层设计方面应侧重考虑的问题。

(3) 研究光强和温度对电池性能的影响。随着光强增大, J_{sc} 呈线性增大, V_{oc} 呈对数式增大,而 FF 及 η 因受串联电阻影响先增大后减小。温度升高电池性能总体变差,表现为 V_{oc} 和 η 随温度升高而降低。

(4) 基于 HOJ 电池的研究基础,改进结构制作异质结(HEJ)电池,并对比了具有相同耗尽区宽度的 HOJ 和 HEJ 电池,发现 HEJ 电池在制备高质量高 In 组分的 InGaN 吸收层,降低串联电阻,提高入射光的吸收,调制光谱响应等方面具有明显的优势,为 InGaN 太阳能电池的发展提供新思路。

(5) 设计、制备三种不同电流扩展层(CSL)的 $\text{In}_{0.135}\text{Ga}_{0.865}\text{N}/\text{GaN}$ 太阳能电池,并对比研究它们的性能。结果表明,CSL 对电池性能影响很大,以 ITO-L 电池性能最佳。入射光的吸收和光生载流子的收集存在此消彼长的关系,合理设计找寻二者的平衡点以及提高 p 型掺杂均至关重要。

(6) 制作 InGaN/GaN 多量子阱结构太阳能电池, 其响应谱拓展到 500 nm 以上, 添加 Al 反射镜的电池转换效率达到 0.335%。进一步研究不同垒厚对载流子输运的影响, 结果表明减小垒厚可增大隧穿几率, 提高光生载流子的收集, 但也可能引起 V_{oc} 变小。此外, 还研发设计了垂直结构 InGaN 太阳能电池, 并提出了多量子阱结构太阳能电池效率的改善途径。

(7) 针对高效多节电池所需子电池的带隙, 以及 MOCVD 生长中 InN 的高挥发性和 NH_3 的低分解率问题, 采用 MBE 外延高 In 组分 InGaN 薄膜。研究表明增大 In 的流量比 r ($r=In/(In+Ga)$), 可提高薄膜 In 的结合率, 调整 III、V 族源流量, 可避免 In 液滴形成并快速提高 In 的组分, 甚至获得更高质量的外延膜, 此外, 较低的生长温度也有利于 In 结合, 这些工作对将来高 In 组分电池的研究具有重要意义。

关键词: InGaN, 太阳能电池, 同质结 (HOJ), 异质结 (HEJ), 高 In 组分

Abstract

The group III nitride alloys and their application have become a hot research field in the semiconductor industry. Normally, they include GaN, InN, AlN and their ternary alloys (InGaN, AlGaIn, InAlN) or quaternary alloys (AlInGaIn). Recently, the InGaIn alloy has attracted much attention due to its excellent photovoltaic properties. This alloy is of tunable direct bandgap (0.65 eV ~ 3.42 eV), with high carrier mobility, high absorption coefficient, high hardness, and superior radioresistance, and also showing the best match to the solar spectrum. The above properties promise to gain bright future of development of high-efficiency tandem cells and space solar cells (SCs). The present study concentrates on the solar cell performance and systematically investigates epitaxial growth, structural design, device fabrication, and performance characterization, etc. Main works are as follows:

(1) The fabricated $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ p-i-n homojunction (HOJ) SCs with low In content show excellent photoelectric response characteristics, e.g. when $x = 0.02$, an open circuit voltage (V_{oc}) of 2.24 V and a fill factor (FF) of 69% are obtained. Further experiments on the cell performance depend on the In content reveal that with increasing In content, the short-circuit current density (J_{sc}) increases, but V_{oc} decreases dramatically with a much larger value than the bandgap resulting reduction. Based on various characterization techniques, we investigated the possible mechanism and proposed that high density defect caused by high In content is the main reason for the dramatic V_{oc} decrease, and the key is to improve the material quality.

(2) Based on external quantum efficiency (EQE) spectra, we analyzed the effect of p-GaN layer thickness on the high-energy photon response and elucidated special references for the window layer design.

(3) Law for the effect of light intensity and temperature on the cell performance. When light intensity is increased, J_{sc} increases linearly and V_{oc} increases logarithmically; however, both FF and η first increase and then decrease due to the existing series resistance. On the other hand, with increasing temperature, the

overall performance of the cells become worse, as suggested in V_{oc} and η decrease.

(4) Enlightened by HOJ SCs, we fabricate heterojunction (HEJ) SCs. Through comparison of HOJ and HEJ SCs, both having the same depletion width, we proposed that HEJ structure is a good alternative candidate for InGaN SCs. Because HEJ SCs show distinct advantages, such as growing high-quality InGaN absorption layer with high In content, reducing series resistance, improving the absorption of incident light, and modulating spectral response.

(5) We have designed and fabricated $\text{In}_{0.135}\text{Ga}_{0.865}\text{N}/\text{GaN}$ SCs with three different current spreading layers (CSLs). Results show that the cell with ITO layer type (ITO-L) presents the best performance. Also, there is a reciprocal relationship between the absorption of incident light and the collection of photo-induced carrier, suggesting that the importance of balance of the both and the p-type doping.

(6) We also fabricate InGaN/GaN multiple quantum well SCs, whose response spectra expand above 500 nm. By adding Al-reflector, a conversion efficiency of 0.335% is obtained. Further study on barrier thickness and carrier transport suggests that thinning the barrier thickness increases the tunneling probability and improving the photo-induced carrier collection, but also result in the V_{oc} reduction. Besides, we also develop the vertical structure InGaN SCs and put forward approaches for the efficiency improvement.

(7) Aiming at the bandgap requirement for high efficiency tandem SCs, and high volatility in InN growth by MOCVD and the resulting low decomposition of NH_3 , we introduce MBE epitaxy to grow high In content InGaN films. Results show that increasing In flux ratio ($r=\text{In}/(\text{In}+\text{Ga})$) and/or selecting low growth temperature can improve the combining rate of In, and by adjusting the ratio of group III and V sources, can avoid the In droplets formation such that improve the In content.

Keywords: InGaN, Solar cell, Homojunction (HOJ), Heterojunction (HEJ), High In content

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪 论	- 1 -
1.1 研究背景.....	- 1 -
1.1.1 能源问题.....	- 1 -
1.1.2 太阳能及其利用.....	- 3 -
1.1.3 太阳能电池的发展.....	- 4 -
1.2 InGaN 太阳能电池.....	- 8 -
1.2.1 InGaN 材料的特性.....	- 8 -
1.2.2 InGaN 太阳能电池的研究进展.....	- 13 -
1.3 InGaN 太阳能电池研究中的关键问题.....	- 16 -
1.4 本文的研究内容和结构安排.....	- 18 -
第二章 InGaN 太阳能电池研究基础	- 20 -
2.1 太阳能电池原理.....	- 20 -
2.1.1 工作原理.....	- 20 -
2.1.2 光电特性和主要表征参数.....	- 22 -
2.2 InGaN 材料的生长技术和表征方法.....	- 26 -
2.2.1 MOCVD 生长技术.....	- 26 -
2.2.2 MBE 生长技术.....	- 28 -
2.2.3 材料的光电特性表征方法.....	- 29 -
2.3 InGaN 太阳能电池的制作和测试.....	- 35 -
2.3.1 制作流程.....	- 35 -
2.3.2 测试方法.....	- 37 -
2.4 本章小结.....	- 38 -
第三章 InGaN p-i-n 同质结太阳能电池	- 39 -

3.1 同质结电池的结构设计.....	39 -
3.2 同质结电池结构性能分析.....	42 -
3.2.1 性能分析.....	42 -
3.2.2 In 组分的影响	45 -
3.2.3 p-GaN 窗口层厚度的影响.....	53 -
3.3 测试条件对电池特性的影响.....	56 -
3.3.1 辐照强度的影响.....	56 -
3.3.2 环境温度的影响.....	59 -
3.4 本章小结.....	64 -
第四章 InGaN p-i-n 异质结太阳能电池.....	65 -
4.1 异质结电池结构设计.....	65 -
4.2 In 组分对电池性能的影响	66 -
4.2.1 材料表征.....	66 -
4.2.2 光电特性.....	69 -
4.3 电流扩展层 (CSL) 对电池性能的影响	72 -
4.3.1 CSL 结构的影响	72 -
4.3.2 CSL 材料的影响	76 -
4.3.3 CSL 对电池特性影响的小结	79 -
4.4 异质结与同质结电池性能对比分析.....	81 -
4.5 本章小结.....	86 -
第五章 高 In 组分 InGaN 太阳能电池.....	88 -
5.1 InGaN/GaN 量子阱结构太阳能电池	88 -
5.1.1 多量子阱结构电池特性分析.....	88 -
5.1.2 垒层厚度的影响.....	92 -
5.1.3 多量子阱结构太阳能电池效率的改善途径.....	99 -
5.2 高 In 组分 InGaN MBE 外延生长.....	100 -
5.2.1 生长研究目标.....	100 -
5.2.2 InGaN 薄膜的外延生长.....	102 -
5.2.3 III、V 族流量的影响.....	104 -

5.2.4 生长温度的影响.....	- 109 -
5.3 本章小结.....	- 111 -
第六章 结论与展望	- 112 -
参考文献.....	- 114 -
在学期间的研究成果	- 126 -
致 谢.....	- 128 -

TABLE OF CONTENTS

Chapter I Introduction.....	- 1 -
1.1 Research Background.....	- 1 -
1.1.1 Energy Resource	- 1 -
1.1.2 Solar Energy & Exploitation.....	- 3 -
1.1.3 Development of Solar Cells	- 4 -
1.2 InGaN Solar Cells	- 8 -
1.2.1 Properties of InGaN Alloys.....	- 8 -
1.2.2 Research Progress of InGaN Solar Cells	- 13 -
1.3 Key Aspects of InGaN Solar Cell Research.....	- 16 -
1.4 Main Works & Structural Arrangement.....	- 18 -
Chapter II The Basics of InGaN Solar Cell Research.....	- 20 -
2.1 Fundamentals of Solar Cells	- 20 -
2.1.1 Working Principle	- 20 -
2.1.2 Photoelectric Characteristics & Main Characterization Parameters	- 22 -
2.2 Growth and Characterization Techniques of InGaN	- 26 -
2.2.1 MOCVD Technique	- 26 -
2.2.2 MBE Technique	- 28 -
2.2.3 Approaches to Photoelectric Characterization	- 29 -
2.2.4 Epitaxial Growth of InGaN.....	- 35 -
2.3 Fabrication and Test of InGaN Solar Cells.....	- 35 -
2.3.1 Fabrication Process	- 35 -
2.3.2 Testing Methods	- 37 -
2.4 Concluding Remarks	- 38 -
Chapter III InGaN p-i-n Homojunction Solar Cells	- 39 -
3.1 Structural Design	- 39 -
3.2 Performance Analysis of HOJ SCs.....	- 42 -

3.2.1 Performance Analysis	- 42 -
3.2.2 Influence of In Content	- 45 -
3.2.3 Influence of p-GaN Window Layer Thickness	- 53 -
3.3 Influence of Testing Conditions on the Performance.....	- 56 -
3.3.1 Radiation Intensity	- 56 -
3.3.2 Ambient Temperature.....	- 59 -
3.4 Concluding Remarks	- 64 -
CHAPTER IV InGaN p-i-n Heterojunction Solar Cells.....	- 65 -
4.1 Structural Design	- 65 -
4.2 Influence of In Content on the HEJ Cell Performance	- 66 -
4.2.1 Characterization of Materials	- 66 -
4.2.2 Photoelectric Characteristics.....	- 69 -
4.3 Influence of Current Spreading Layer on the Performance.....	- 72 -
4.3.1 Structural Patterns	- 72 -
4.3.2 Selected Materials	- 76 -
4.3.3 Summary	- 79 -
4.4 Comparative Analysis of the Performance of HEJ and HOJ Cells ...	- 81 -
4.5 Concluding Remarks	- 86 -
CHAPTER V High In Content InGaN Solar Cells	- 88 -
5.1 InGaN/GaN Quantum Well Solar Cells	- 88 -
5.1.1 Characteristic Analysis.....	- 88 -
5.1.2 Influence of Barrier Thickness.....	- 92 -
5.1.3 Efficiency Improvement of MQW SCs	- 99 -
5.2 MBE Growth of High In-Content InGaN.....	- 100 -
5.2.1 Research Goal of Growth.....	- 100 -
5.2.2 MBE Growth of InGaN	- 102 -
5.2.3 Influence of III, V Element Flux.....	- 104 -
5.2.4 Influence of Growth Temperature.....	- 109 -
5.3 Concluding Remarks	- 111 -

CHAPTER VI	Conclusions & Prospects.....	- 112 -
References		- 114 -
Achievements.....		- 126 -
Acknowledgements		- 128 -

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

当前，经济快速增长与能源环境的矛盾日益尖锐，全球性的能源危机、频繁化的极端气候已引起世界各国的高度重视，一场规模空前的能源革命是全世界不得不面临的共同选择。高碳经济低碳化逐渐成为国际学术界和工业界的研究热点，为推动世界经济的可持续发展，人们开始提倡“低碳、环保、清洁”的可再生能源的开发利用。期间，全世界掀起了利用太阳能电池将太阳光能转化为电能的研究热潮。

第三代半导体 InGaN 基材料以其优越的光伏特性，吸引人们探索其在太阳能电池方面的应用。InN 带隙的重新修正，意味着 InGaN 合金材料的带宽（0.65 eV ~ 3.42 eV）对应的吸收光谱可拓展覆盖几乎整个太阳光谱，相比于其他材料体系，更容易满足多结电池对材料带隙的需求，这给进一步提高多节电池转换效率带来新的契机。此外，该材料还具有高吸收系数、强抗辐射能力等优点，在制作全光谱太阳能电池和高效空间太阳能电池方面具有广阔的应用前景。近年来，这种新型材料电池以其无可比拟的潜在应用价值，迅速成为业界关注的焦点。

1.1 研究背景

1.1.1 能源问题

什么是能源？《大英百科全书》对能源的解释为：“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语，人类采用适当的转换手段，给人类自己提供所需的能量。”能源是人类取得能量的来源，包括已开采出来可供使用的自然资源，以及经过加工或转换的能量来源。能源按照能否反复使用，可分为：可再生能源和非可再生能源；按照人们开发和使用的程度，可分为常规能源和新能源。新能源是相对于常规能源而言的一个概念，是采用新技术和新材料而获得，在新技术基础上系统地开发利用的能源。目前普遍认为除了常规的化石能源和核能以外，其他的能源都可称为新能源和可再生能源，主要为太阳能、地热能、风能、海洋能、生物质能、氢能和水电^[1]。

能源是人类生存与发展的物质基础，也是社会发展的动力。回眸人类开发利

用能源的历史，主要经历三次大转换：第一次在 18 世纪后半叶，英国人瓦特发明了蒸汽机，从此煤炭取代木材成为主要能源，人类跨入“煤炭时代”。第二次在 19 世纪 60 年代，石油取代煤炭成为能源主力军，出现了世界规模的“石油时代”。目前，世界能源正面临一个新的转折点，即第三次能源大转换时期，能源消费结构已由石油为主要能源逐步向多元能源过渡，以化石燃料为主体的世界能源系统将在 21 世纪转化成以可再生能源等为主要组成部分的新的世界能源系统，能源多元化是 21 世纪世界能源发展的必然趋势^[2]。从能源发展的历程中不难看出，三次大能源革命都是以高效能源取代常规能源，从此人类社会出现一轮又一轮的新飞跃。

当前，社会处于空前高速发展时期：世界经济高速增长，人类生活水平不断提高，社会生产力飞速发展。于此同时，对能源的需求量也越来越大，能源短缺、环境污染、生态破坏、气候极端等问题不断凸显并加深。化石燃料是地层长达亿万年的能量存储结果，远比人类生活发展的年代漫长，这些能源无法在短期内再生。而且，燃烧化石燃料释放出大量的 CO_2 、 SO_2 、 NO_2 和烟尘，它们是造成大气污染，引发温室效应的主要来源，是今日危害社会发展的元凶^[3]。人们开始认识到曾经支撑工业化大发展的化石燃料，已经不可能再支持当前人类社会文明的可持续发展，一场规模空前的能源革命是全世界不得不面临的共同选择。2005 年 2 月 16 日《京都议定书》正式生效，人类历史首次以法规的形式限制温室气体排放，规定各国应完成的减排目标和减排方式。2007 年 3 月 9 日，欧盟领导人就减少温室气体排放、遏制气候变暖的一系列措施达成一致意见，承诺在 2020 年之前，将欧盟温室气体排放量在 1990 年的基础上减少 20% 以上，并实现欧盟可再生能源占总能源耗费比例的 20%^[4]。美国政府于 2009 年出台了《美国恢复与再投资法案》和《美国清洁能源安全法案》，把能源列为重要领域的第一位，提出清洁能源复苏战略，核心思路是将气候变化和经济安全、能源安全统筹起来考虑，强调新能源和低碳经济对美国未来经济竞争力和国际地位的重大影响，奥巴马的能源革命将推动一场新的经济革命，其意义远比信息革命更为重大、更为深远^[5-6]。中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要中指出“推动能源生产和利用方式变革”，“加快建设资源节约型、环境友好型社会，提高生态文明水平”，“调整优化能源结构，构建安全、稳定、经济、清洁的现

代能源产业体系”^[7]。

2011 年，西亚北非动荡和日本核事故，进一步对世界能源形势产生了深远影响。我们既不能无节制地燃烧化石燃料，释放更多的温室气体，也不能无所顾及、毫无防范地大肆兴建众多的核电厂。而应该“改变能源结构，保护地球”，开发利用无污染、可持续再生的清洁能源，以保障世界安全稳定可持续的发展。据有关部门预测，今后能源发展将出现几个特点^[8]：大约到 21 世纪中叶，石油资源将完全耗尽；由于对环境的严重污染，煤炭利用将逐渐受到限制；核安全和核废料处理技术尚未完全解决，若无技术上突破将很难获得更大发展；太阳能、风能、氢能以及其他各种可再生能源，将逐渐成为世界能源的主角。图 1-1 是欧盟委员会联合研究中心对 2000-2100 年的能源形势预测，从中可明显看出化石燃料能源的有限性和各类可再生能源的发展潜力，其中光伏和太阳能热发电逐渐占据主导地位，其效能最为鲜明长远。

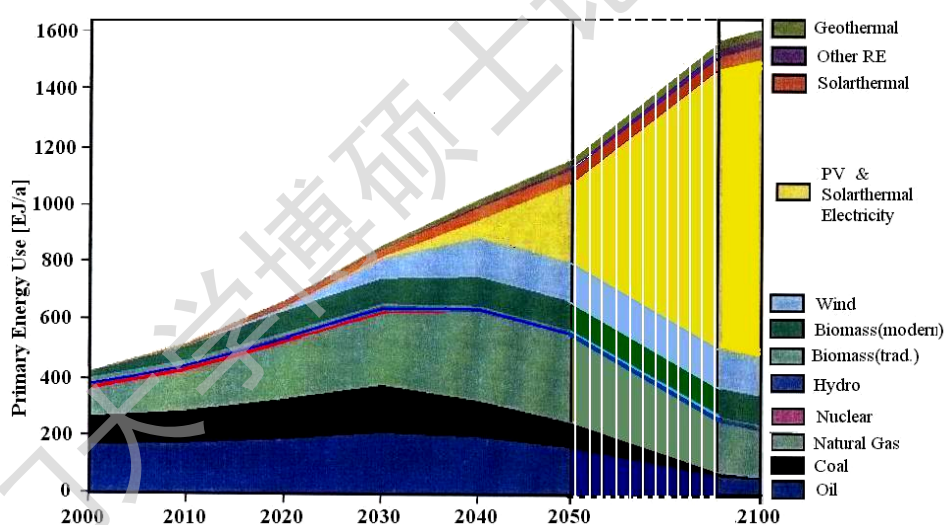


图 1-1 欧盟委员会联合研究中心（JRC）的能源形势预测

1.1.2 太阳能及其利用

科学家们认为，太阳能是未来人类社会最合适、最安全、最绿色、最理想的替代能源。首先，太阳能是取之不尽，用之不竭的。太阳本质上是个不断进行氢聚变的热核反应堆，每时每刻都在向外辐射能量。太阳辐射能即太阳能，经过地球大气层的衰减，每秒最终达到地球表面的约有 8.5×10^{13} kW，它相当于全世界发电总量的几十万倍。根据氢聚变的速率计算，地球内部氢聚变过程的生命约为

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库